

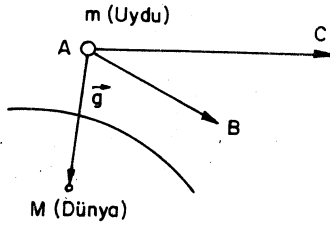
1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın 2. yarısında yapma uydular ve bilgisayarlar Jeodezinin gelişmesine ve büyük problemlerin çözümüne ışık tuttu.

İlk yapma uydu SPUTNIK'in 4 Ekim 1957 tarihinde yörüngeye oturtulmasından sonra her sahada yapma uydulardan yararlanma araştırma ve çalışmaları başladı. O tarihten bugüne kadar 1000' in üzerinde yapma uydu dünya etrafında yörüngelerine oturtuldular. Bu uydular haberleşme, Jeodezide, meteorolojide ve diğer birçok sahada çözümler getirdiler. Biz bu yazıda uyduları ve hareket prensiplerini kısaca inceledikten sonra çeşitli disiplinlere katkılarını açıklayacağız.

UYDULARIN HAREKETİ

$m$  kütesine sahip bir uydunun  $M$  kütesine sahip dünya etrafındaki hareketini açıklayabilmek için aşağıdaki şekli gözönünde bulunduralım. (Şekil 1)



Şekil:1. Uydunun Dünya Etrafındaki Hareketi.

A noktasında uyduya  $\vec{AC}$  yönünde bir kuvvet tatbik edelim. Yerçekimi  $\vec{g}$  nedeniyle uyu  $\vec{AC}$  ve  $\vec{g}$  nin bileşkesi olan  $\vec{AB}$  yönünde hareket edecek ve dünya etrafında dönecektir.

Yapma ve tabii uyduların dünya etrafındaki dönmeleri Newton'un çekim kanunu ve Kepler kanunları ile izah edilebilir (Şekil:2).  
Newton'un çekim kanunu ifadesi aşağıdadır.

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$$

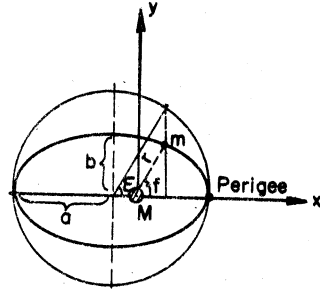
G = Newton çekim sabiti  
=  $6.670 \times 10^{-8}$  (c.g.s. sisteminde)

f: gerçek anomali (true anomaly)

E: Eksentrik anomali  
(eccentric anomaly)

$$e = \sqrt{(a^2 - b^2) / a^2} : \text{Eksentrisite}$$

Perigee : uydunun dünyaya en yakın olduğu nokta



Şekil : 2. Uydunun yörüngedeki tanımı.

Kepler kanunları da kısaca aşağıda açıklanmıştır( Smart, 1979).

Kepler'in ilk kanunu: Uydunun yörüngesi odaklarından birinde dünyanın yer aldığı bir elipstir.

Kepler'in ikinci kanunu : Dünya ile uydu arasındaki yarıçap vektörü( $\vec{r}$ ) eşit zaman aralığında eşit alan süpürür.

Kepler'in üçüncü kanunu : Peryodun karesi ve büyük eksenin kübü ters orantılıdır.

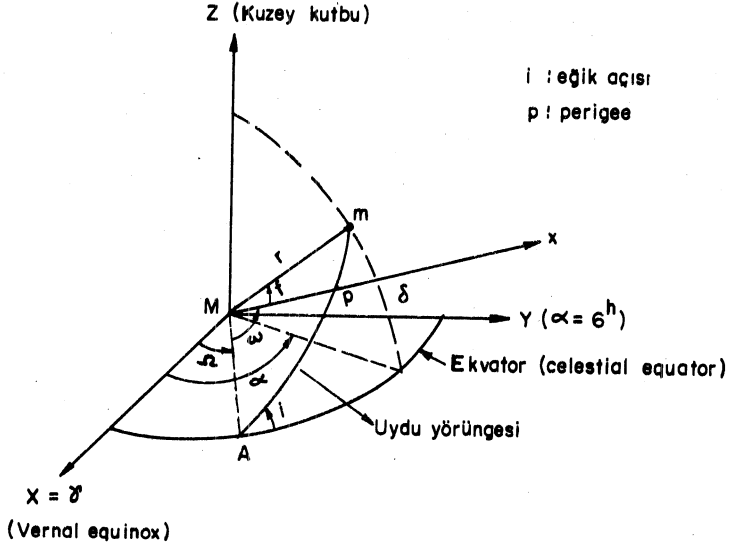
$$\frac{4\pi^2}{p^2} a^3 = G(M+m) \approx GM = \text{sabit} \quad (1)$$

p = Period  
a = ekvator yarıçapı (büyük eksen)

Sadece dünya ve uydunun varlığı ve boşluktaki hareket kabulüyle yukarıdaki kanunlara göre hareket normal bir yörünge üzerinde olmaktadır. Uydunun yörüngedeki pozisyonu genellikle (x,y) koordinatları ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} x &= a (\cos E - e) \\ y &= a (1 - e^2)^{1/2} \sin E \end{aligned} \quad (2)$$

Fakat bu koordinat sistemi uyduya bağımlıdır. Genel bir koordinat sistemi olarak (X,Y,Z) inertial koordinat sistemi kullanılabilir (Şekil:3).



Şekil : 3. İntertial Koordinat Sistemi.

$\Omega$ ,  $\omega$ ,  $i$ ,  $a$ ,  $e$  ve  $T$  (Perigee geçiş zamanı) veya  $E$  eliptik normal yörüngeyi tanımlayan Kepler elemanları ( $E$ ) olarak bilinirler, yani

$$E = [\Omega, \omega, i, a, e, T]^{\text{transpose}}$$

Kepler elemanlarından da aşağıdaki bağıntıyla inertial koordinat sistemine dönüşüm mümkündür.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\Omega, i, \omega) \begin{bmatrix} x \\ y \\ o \end{bmatrix}$$

Yukarıda sadece dünya ve uydu varlığını farzederek, uydunun boş - luktaki (vacuum) hareketini inceledik. Gerçekte yapma uydular, tamamen (veya kısmen) atmosferde hareket etmekte, dünyanın basıklığından, homojen olmayan yapısından, aydan, güneşten, gezegenlerden v.s. etkilenmektedirler. Neticede uydular normal bir yörünge yerine sapmış yörün - geler üzerinde dönme hareketlerine devam ederler. Eğer  $E_i(T_0)$ ,  $T_0$  anındaki Kepler elemanları ise bir  $T$  anındaki  $E_i(T)$  Kepler elemanları aşağıdaki ifadeden bulunabilir.

$$E_i(T) = E_i(T_0) + \underbrace{\int_{T_0}^T \dot{E}_i \cdot dt}_{\Delta E} \quad (4)$$

$\Delta E$ ,  $(T_0, T)$  aralığında Kepler elemanlarındaki sapmayı ve  $\dot{E}_i$  de bu elemanlardaki aşağıda açıklanan saptırıcı kuvvetler (perturbing forces) nedeniyle meydana gelen değişme oranını temsil etmektedir.

- a) Dünyanın küresel olmayan kısımlarının ve homojen olmayan yapısının doğurduğu çekim kuvvetleri (500 veya daha fazla parametre)
- b) Atmosferin direnci (atmospheric drag)
- c) Radyasyon basıncı, güneş - ay çekimi manyetik tesirler v.s.

Uydulara yapılan ölçümler sayesinde yukarıdaki kuvvetleri oluşturan parametreler hesaplanabilir.

### 3. JEODEZİ VE YAFMA UYDULAR :

Jeodezi dünyanın boyutları, şekli ve yerçekimi alanının tayiniyle uğraşan bir ilimdir. Kontrol ağlarının kurulması ve uydularla ilgili bazı çalışmalar da Jeodezinin kapsamı içindedir.

Tatbikatta bir nokta tabii veya tarif edilen bir koordinat sisteminde ifade edilir. Üç - boyutlu bir koordinat sistemi düşüncecek olursak, uzaydaki bir nokta bu sistemin eksenlerine uzaklığı ile tanımlanabilir. Eğer bu koordinatlardan birisini sabit tutar, diğer ikisinin değişimine müsaade edersek bir koordinat yüzeyi elde ederiz. DATUM da bizce tarif edilen bir referans yüzeyidir. Ölçümler DATUM'a indirgenir ve hesaplar yapılır.

Maalesef üzerinde ölçülerimizi yaptığımız yeryüzü, basit bir yüzey değildir. Eğer ortalama deniz yüzeyi ile çakışan eş potansiyelli GEOİD'i ele alacak olursak görürüz ki basit ve kapalı bir formül onu ifadeye yeterli değildir. Bu yüzey derece ve sırası sonsuza giden polinomlarla açıklanabilir. Dolayısıyla GEOİD kontrol ağları için DATUM yüzeyi olamaz. Bu nedenle basit bir formülle ifade edilebilen, üzerinde dengeleme, direk ve dolaylı hesapların yapılabileceği bir yüzey tarif edilir ve ölçümler bu yüzeye indirgenir. Global uygulamalar için ortalama dünya elipsoidi kullanılır. Bu elipsoidin boyutları  $a = 6378138$  m,  $f = 1/298.257$  olup

- orijini dünya kütle merkezinde
- x- ekseni Greenwich meridyeninden geçmekte
- y- ekseni x- eksenine dik(doğu yönünde)
- z- ekseni dünyanın dönme ekseniiyle çakışık olarak tarif edilmiştir. Burada Kartezyen koordinatlar ve kutupsal (küreler) koordinatlar arasında,

Yukarıdaki dönüşümlerin temelinde dünyanın çekim alanının tayini yattır. Hatta iki nokta arasındaki yükseklik farkının nivelman ile bulunmasında bile yerçekimine ihtiyaç vardır.

Maaalesef ekonomik ve politik nedenlerle yeryüzünde uniform yerçekimi değerlerine sahip değiliz. İleriki bölümlerde göreceğimiz gibi bu sorunu ve diğer bazı sorunları çabuk ve ekonomik bir şekilde çözebilmek için uydulardan yararlanılabilir.

#### 4. UYDU GÖZLEMLERİNDEKİ AMAÇLAR :

Jeodezide uydu gözlemlerinden beklenenleri aşağıdaki tarzda sınıflandırabiliriz :

- Bilimsel amaç
  - Dinamik amaç
  - Geometrik amaç
- Operasyon amacı
- Harita yapımı

#### A. BİLİMSEL AMAÇ

##### A.1. Dinamik Amaç

Uyduların hareketleri zamanın bir fonksiyonu olarak gözetlenir. İstenilen bir epoktaki uydu pozisyonunun tayini için de; matematiksel hareket teorisine (theory of motion) , bazı fiziksel parametrelerin hassas olarak bilinmesine (potansiyel katsayıları, hava yoğunluğu, ay-güneş çekimi v.s), ve gözlem yeri koordinatlarının hassas olarak bilinmesine ihtiyaç vardır. Herşeye rağmen ölçülen değer ve hesaplanan değer farklı olacaktır. Bu farktan yararlanarak hareket teorisi geliştirilebilir ve yukarıda bahsedilen parametreler hesaplanabilir veya geliştirilebilir. Bunlara ilave olarak bu ölçülerle fay ve tabaka hareketleri, kutbun hareketi (polar motion), dünyanın dönme hızındaki değişiklikler v.s. tayin edilebilir. Hesap ve ölçü değerleri arasındaki fark aşağıdaki matematik model ile ifade edilebilir (Mueller, 1975)

$$\ell_{\text{ölçülen}} - \ell_{\text{hesaplanan}} = \sum_j \frac{\partial \ell_{\text{hesaplanan}}}{\partial P_j} dP_j + \sum_k \frac{\partial \ell_{\text{hesaplanan}}}{\partial S_k} dS_k$$

(9)

Burada  $P_j$  : hatalı yörünge elemanları (yerçekimi, atmosfer v.s. parametrelerine bağlı)  
 $S_k$  : hatalı gözlem istasyon koordinatları

## A.2. Geometrik amaç

DATUM transferi ve ortak bir sistemde koordinatların ifadesi buradaki asıl amaçtır. Bu gaye için kullanılan 2 metod vardır:

a) Yörüngesel Metod Koordinatları bilinen çeşitli istasyonlardan ölçüler yapılır ve bu istasyonların koordinatları geliştirilir.

b) Uzay Nirengi Metodu Uydu bir hedef olarak kullanılır. Uyduya koordinatları bilinen ve bilinmeyen noktalardan ölçüler yapılır. Böylece bilinmeyen koordinatlar hesaplanır ve bilinenler geliştirilir.

Yukarıdaki gözlemler sayesinde yer istasyonları ortak bir geosentrik sistemde ifade edilebilir, mevcut ağılardaki ölçük hataları, sistematik hatalar ve distorsiyonlar(distortion) kontrol edilebilir. Ayrıca bu ölçüler yeni bir kontrol ağı kurulmasında da kullanılabilir.

## B. OPERASYON AMACI

Uydu ephemerislerini güncelleştirmeye yarar. Bu ephemerisler sayesinde kullanıcılar uydulardan kendi alanlarında yararlanabilirler.

## C.HARİTA YAPIMI

Yapma uydular gayet hızlı ve de ekonomik olan harita yapımında kullanılabilir. LANDSAT uydusu buna bir örnek olarak verilebilir. Birkaç aylık bir süre içinde bütün dünyayı kapsayan küçük ölçekli haritalar bitirilebilmiştir. LANDSAT ölçüleri REMOTE SENSING' de de büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca GEOS - 3 ve SEASAT altimetre ölçülerinden de deniz yüzeyinin topoğrafik haritasını yapmak mümkün olmuştur (Rapp,1977).

#### 4. YAPMA UYDULARA GÖZLEMLER

Uydu ölçülerinde aşağıdaki metodlar kullanılır.

- Optik metod
- Fotoğrafik Metod
- Elektronik Metodlar ve diğerleri

##### A. OPTİK METOD

Uydulara olan semt ve düşey açılar ölçülerek ölçü epokundaki ve gelecek epoklardaki uydu koordinatları yaklaşık olarak hesaplanabilir. Halen, çoğunluğu A.B.D. ve Rusya'da olmak üzere , 220 kadar optik gözlem istasyonu mevcuttur.

##### B. FOTOĞRAFİK METOD

Geceleri arkasında yıldızlarla birlikte uyduların resimleri çekilip koordinatları bilinen yıldızlardan uyduların koordinatları hesaplanabilmektedir.

##### C. ELEKTRONİK METODLAR ve DİĞERLERİ

Uyduların Jeodeziye katkıları ve dinamik jeodezinin doğuşu bu grupta olan ölçüler sayesinde. Aktif bir uydu gerektiren bu metodlar ölçü türlerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

###### a) Uzaklık, uzaklık değişimi ölçüleri (Range, range rate measurements)

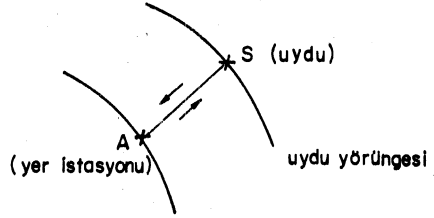
Uzayda yayılan elektromanyetik bir dalganın modülasyonu aldığı yol ve modülasyon frekansına bağlı olarak bir faz kaymasına (phase shift) uğrar. Bu kaymadan yararlanarak uzaklık, uzaklık değişimleri tayin edilebilir. Her türlü hava şartlarında yapılabilen bu sınıftaki ölçüler de kendi aralarında dörde ayrılırlar :



### a.1. Yerden uzaklık ölçüleri

#### (Ground Ranging)

Yer istasyonu A dan yansıtıcı( lar) taşıyan uyduya gönderilen ve geri gelen sinyallerle AS mesafesi ölçülür (Şekil :5)

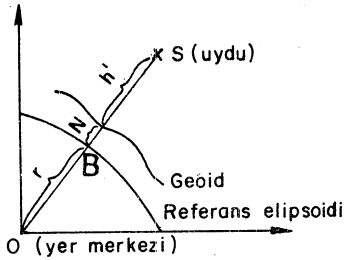


Buna misal olarak STARLETT(Fransız) ve LAGEOS (A.B.D) uyduları gösterilebilir. Bu metodla 3000 km ye kadar olan mesafelerde  $10^{-7}$  lik bir baz hassasiyeti sağlanmıştır.

Şekil:5 Yerden Uzaklık Ölçüleri

### a.2. Uydü Altimetre Ölçüleri (Satellite Altimetry)

Uyduya yerleştirilen altimetre uydü ile deniz yüzeyi (GEOID) arasındaki mesafeyi ölçer (Şekil:6). Bu ölçüler andulasyon, yerçekimi anomalisi v.s. hesaplarında kullanılır.



$$N \text{ (andulasyon)} = OA - r - h'$$

OA : Uydü koordinatlarından hesaplanan mesafe

h' : Altimetre ölçüsü

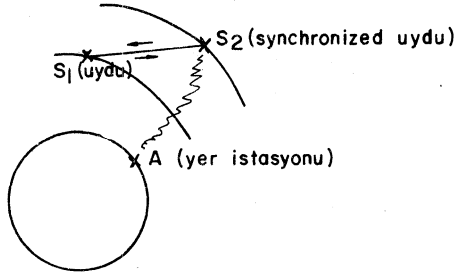
r : B noktasının jeodezik koordinatlarından hesaplanan yarıçap.

Şekil : 6. Uydü Altimetre Ölçüleri.

GEOS - 3 ve SEASAT altimetre ölçüleri deniz yüzeyi haritasının yapımında kullanılmıştır (Rapp, 1977). Bu ölçüler andulasyon ve yer - çekimi anomali hesaplarında (denizlerde ve okyanuslarda) kullanılmışlardır. GEOS - 3 ölçüleri dengeleme neticesinde andulasyonlar için  $\pm 0.7$  m ve yerçekimi anomalileri için  $\pm 25$  mgal ortalama hata bulunmuştur. SEASAT ölçüleri daha hassas olup genel bir spektral analiz Eren (1981) de bulunabilir.

#### a. 3. Uydudan Uyduya Ölçüler (SST. Satellite to Statellite Tracking)

Birisi atmosferde ve diğeri atmosfer dışında olan iki uydu arasında direk uzaklık ölçülür, böylece sinyaller atmosferin en berbat kısmından geçmek zorunda kalmaz (Şekil: 7).

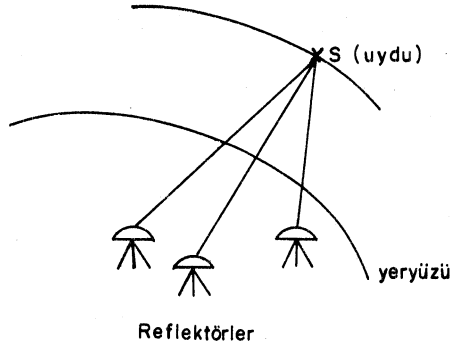


Şekil : 7. Uydudan Uyduya Ölçüler

#### a.4. Uydudan yerdeki noktalara uzaklık ölçüleri

(Space born ranging system )

a.1. de anlatılan metod yer istasyonları maliyetinin fazla olması nedeniyle ekonomik değildir. Çok daha hızlı ve ekonomik olanı burada olduğu gibi uydunun yeryüzüne yerleştirilmiş reflektörlere sinyaller göndererek mesafe tayinidir. (Şekil:8).



Şekil :8. Uydudan yerdeki noktalara uzaklık ölçüleri

Bu metodla çok uzun mesafelerde 1-2 cm lik bir hassasiyet beklenilmektedir.

#### B. GRADIOMETRE ÖLÇÜLERİ

Uyduya yerleştirilmiş bir gradiometre ile yerçekimi gradienti (yerçekimi türevi) ölçülerek yerçekimi alanı tayin edilir. Bu metod hızlı ve ekonomik olup bütün yeryüzünü birkaç haftada kapsayabilecektir. Ayrıca data dağılımı homojen olup ölçüler atmosferden etkilenmezler.

#### C. DOPPLER PRENSİBİ ve ÖLÇÜLERİ :

Uydu sabit bir frekansta ( $f_T$ ) module edilmemiş devamlı dalgalar gönderir. Uydu ve yer istasyonu arasındaki relatif hız nedeniyle  $f_T$  yer istasyonunda değişik bir  $f_R$  frekansı olarak algılanır. Algılanan  $f_R$  ve gönderilen  $f_T$  frekansları arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur.

$$f_R = f_T \left( 1 + \frac{\dot{r}}{c} \right) \quad (10)$$

c: ışık hızı (velocity of light)

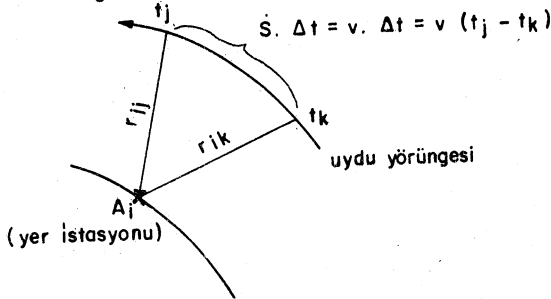
$\dot{r}$ : Uydunun radial hızı (radial velocity)

Doppler metodu algılanan  $f_R$  frekansının ve yerde muhafaza edilen bir  $f_0$  standart frekansının fazlarının değişme oranlarının farkını kullanır. Bu sayede aşağıda ifade edilen  $N_{ijk}$  Doppler Count hesap edilir.

$$N_{ijk} = \int_{t_j}^{t_k} (f_0 - f_R) dt \quad (11)$$

Ve nihayet  $\Delta r_{ijk} = r_{ij} - r_{ik}$  yarıçap vektöründeki değişiklik aşağıdaki bağıntı ile verilir (Şekil:9)

$$\Delta r_{ijk} = \frac{c}{f_0} (N_{ijk} - (f_0 - f_T) (t_k - t_j)) \quad (12)$$



Şekil :9. Doppler Ölçüleri

Doppler ölçüleri uygulamalarında genel bir dengeleme ve çözüm yerine kısmi bir çözüm kullanılır. Bu gaye için kullanılan iki yaygın metod mevcuttur (Mueller, 1975).

- Kısa - yay metodu (short - arc metod )
- Nokta pozisyon tayini metodu (point positioning method)

Bu metodlar bilinmeyen olarak her geçiş için 6 yörünge elemanını ve ölçü yapılan istasyonların koordinatlarını ihtiva eder.

Kısa yay metodunda data genellikle 10-30 dakika uzunluğundaki uydu ge- çişleriyle sınırlıdır. Koordinatları bilinen bir referans istasyonuna göre diğer istasyonların relatif konumları tayin edilir. Aynı yay par - çasının gözlem istasyonlarına tesiri eşit olacağından bu konumlar yö- rüngesel ve diğer bağımlılıklardan (biases) serbest kabül edilir.

Nokta pozisyon tayini metodunda data genellikle birkaç gün uzun - luğundadır. Ölçü anındaki yörünge elemanları hassas uydu ephemeris - lerinden alınır. Burada gözlem yapan istasyonların koordinatları yegane bilinmeyenlerdir.

Ayrıca önceden tahmin edilen ve daha az hassas yörünge elemanlarını uydu belleğinde muhafaza edip doppler alıcıları tarafından kullanılmak üzere geri transfer mümkün olmaktadır. Bu durumda uydu aynı zamanlarda en az iki istasyondan gözetlenir ve böylece relatif pozisyonlar tayin edilir. Bu tür operasyon TRANSLOCATION olarak adlandırılır.

#### Doppler ölçülerinin kullanıldığı sahalar

Doppler ölçü türlerini gördükten sonra bu ölçülerin kullanıldığı sahaları şu şekilde sıralayabiliriz :

- Yer istasyonlarının geosentrik koordinatlarının hesabı
- Jeodezik ağların bağlanması ve geosentrik koordinatlara dönüştürülmesi
- Mevcut koordinatların hassasiyetlerinin arttırılması
- Değişik koordinat sistemleri arasındaki transformasyon parametrelerinin hesabı

- Ölçü istasyonlarındaki andulasyon değerlerinin hesabı
- Kontrol ağı tesisi

Bilindiği gibi klasik nirengi ağlarında komşu noktalar arasında hassasiyet oldukça iyi fakat uzun mesafelerde hassasiyet ve absolut pozisyon oldukça zayıftır. Halbuki doppler koordinatları mesafeye bağlı olmayıp daha hassas absolut pozisyon değerlerine imkan vermektedir.

Kolayca görülebileceği gibi klasik metodlar ve doppler metodu tamamen bağımsız, korelasyonsuz ölçüler ve modeller kullanılmaktadırlar. Bu bağımsız verilerin birleştirilmesi tamamen güvenilir değerler ortaya çıkaracaktır.

#### Doppler Uygulamaları

- Kanada'da 1976 yılında mesafeleri 500 km den kısa 6000 noktalık distorsiyonsuz bir doppler ağı kuruldu ve dengelendi. Ayrıca bu noktalardaki andulasyon değerleri de hesaplanıp geoid (Kanada için)  $\pm 0.7$  m. duyarlıkta hesaplandı.

-Yeni ağ dengelemelerinde kullanmak üzere Meksika bir doppler ağı kurdu.

- Avrupa'da çok sayıda bölgesel doppler ölçüleriyle bölgesel distorsiyonların ve sistematik hataların analizi yapıldı, ağlar kuvvetlendirildi.

- Grönland'da hiçbir ölçü ve kontrol ağı bulunmayan yerlerde doppler ölçüleriyle kontrol ağı oluşturuldu.

- A.B.D ve diğer birçok memlekette de çok sayıda doppler ölçüleri yapılmakta ve kullanılmaktadır.

## 7. AYA UZAKLIK ÖLÇÜSÜ ve VLBI

Yukarıdaki yapma uydularla ölçülere ilave olarak aynı amaçlarla kullanılabilen ve yapma uydulara gereksinimi olmayan iki metod daha mevcuttur .Bunlar aya uzaklık ölçümü (Lunar laser ranging) ve çok uzun baz interferometrisidir. (VLBI, very long baseline interferometry)

Ayda Apollo 11, 14, 15 ve Lunar 17, 21 tarafından yerleştirilmiş 5 reflektör mevcuttur. Aydaki reflektörlere laser ışınları gönderilerek uzaklık ölçülür. Bu ölçüler sayesinde çok hassas baz uzunlukları, kutbun hareketi ( 0".02 den daha iyi) , UTO zamanı (1 milisaniyeden daha iyi) tayin edilebilmiş ve ay teorisi, yerçekimi teorisi, ay topoğrafyası geliştirilebilmiştir.

VLBI 1968' den beri kullanılmaktadır. VLBI metodunda galaktik ötesi radyo kaynakları gözetlenir. Bu metodla çok hassas baz uzunluğu (380 - 5000 km de  $10^{-7}$  hassasiyet), kutbun hareketi ve dünyanın dönüşündeki düzensizlikler hassas olarak hesap edilebilmiştir.

## 8. SONUÇ

Yukarıda bahsedilen yapma uydular, aya uzaklık ölçüleri ve VLBI jeodezide yeni bir devir açmıştır. Kısa bir süre önce düşünmeye cesaret edilemeyen problemler bugün çözülebilmektedir. Bazı parametreler tayin edilebilmekte, teoriler geliştirilebilmekte ve global sistemler kurulabilmektedir.

Türkiye'de de uzayda serbestçe dolaşan insanlığın hizmetindeki uydulardan yararlanma için başlatılan teşebbüsler geç kalınmış olmasına rağmen sevindiricidir. Ayrıca NASA ve Avrupa Uzay Dairesi fay ve plaka hareketlerini tayin için Türkiye'de mobil laser istasyonları kurmayı planlamaktadırlar.

## KAYNAKLAR

- Eren, Kamil, "Spectral Analysis of Geos - 3 Altimeter Data and Frequency Domain Collacation", Department of Geodetic Science, Report No. 297, The Ohio State University, Columbus, February 1980.
- Heiskanen, W.A, Moritz, H., "Physical Geodesy", W.H. Freeman and Company, London, 1967
- Moritz, H., "Fundamental Geodetic Constants", Report of Special Study Group No. 5. 39 of IAG, Bulletin Geodesique, No.118, 398 - 408, 1975.
- Mueller, I.I, "Introduction to Satellite Geodesy", Frederick Ungar Publishing Co., New York 1964
- Mueller, I.I., "Tracking Station Positioning From Artificial Satellite Observations", Geophysical Surveys 2, pp. 243 - 276, 1975
- Rapp, R.H., "Mean Gravity Anomalies and Sea Surface Heights Derived From GEOS - 3 Altimeter Data", Department of Geodetic Science, Report No. 268 , The Ohio State University, Columbus, December 1977.
- Smart, W.M., "Textbook on Spherical Astronomy", 6<sup>th</sup> edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1977.